

## EFEKTIVITAS ADSORBEN LIMBAH AMPAS KOPI PADA LIMBAH CAIR KELAPA SAWIT

**Rendy Pratama Putra, Delovita Ginting\*, Romi Fadli Syahputra**

*Program Studi Fisika, Fakultas MIPA dan Kesehatan, Universitas Muhammadiyah Riau, Jalan Tuanku Tambusai, Pekanbaru, 282121, Indonesia*

\*email: delovita@umri.ac.id

### ABSTRAK

Limbah cair pabrik kelapa sawit (*Palm Oil Mill Effluent /POME*) memiliki kandungan bahan organik yang tinggi, yang tercermin dari nilai *Chemical Oxygen Demand (COD)*, sehingga berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan apabila tidak diolah secara memadai. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan adsorben berbasis limbah ampas kopi dalam menurunkan *COD POME* serta mengkaji kinetika adsorpsinya. Proses adsorpsi dilakukan secara batch dengan variasi waktu kontak 35–95 menit. Karakterisasi adsorben dilakukan menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)* untuk mengidentifikasi gugus fungsi dan *Scanning Electron Microscopy (SEM)* untuk mengamati morfologi permukaan. Analisis kinetika adsorpsi difokuskan pada model *Elovich*, *Bangham*, dan *Boyd* untuk menilai kesesuaian model terhadap data eksperimen. Hasil penelitian menunjukkan bahwa adsorben ampas kopi mampu menurunkan *COD POME* dengan efisiensi maksimum 13,13% dan kapasitas adsorpsi 2,8604 mg/g pada waktu kontak optimum 65 menit. Di antara model yang diuji, model *Bangham* memberikan kecocokan terbaik, sedangkan model *Boyd* menunjukkan kesesuaian yang sangat rendah. Temuan ini menunjukkan bahwa adsorben limbah ampas kopi berpotensi digunakan sebagai adsorben alternatif, tetapi masih memerlukan optimasi lebih lanjut sebelum diterapkan pada skala yang lebih luas.

**Kata Kunci:** Limbah ampas kopi; Adsorpsi; COD; Kinetika adsorpsi; POME

### ABSTRACT

**[Title: Effectiveness Of Coffee Grounds Waste Adsorbent On Palm Oil Liquid Waste]** *Palm Oil Mill Effluent (POME)* contains a high concentration of organic matter, as reflected by its elevated *Chemical Oxygen Demand (COD)*, and may cause environmental pollution if not adequately treated. This study aimed to evaluate the ability of an adsorbent derived from spent coffee grounds to reduce the *COD* of *POME* and to investigate its adsorption kinetics. Batch adsorption experiments were carried out with contact times ranging from 35 to 95 minutes. The adsorbent was characterized using *Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)* to identify functional groups and *Scanning Electron Microscopy (SEM)* to observe surface morphology. Adsorption kinetics were assessed using the *Elovich*, *Bangham*, and *Boyd* models to determine the best-fitting model. The results showed that the spent coffee grounds adsorbent achieved a maximum *COD* removal efficiency of 13.13% and an adsorption capacity of 2.8604 mg/g at an optimum contact time of 65 minutes. Among the evaluated models, the *Bangham* model provided the best fit, while the *Boyd* model showed very poor agreement. These findings indicate that spent coffee grounds have potential as an alternative adsorbent, although further optimization is still required before broader application.

**Keywords:** Adsorption; COD; POME; Spent coffee grounds; Adsorption kinetics

## PENDAHULUAN

Industri kelapa sawit merupakan salah satu sektor strategis penopang perekonomian Indonesia. Provinsi Riau tercatat sebagai salah satu wilayah dengan luas perkebunan kelapa sawit terbesar sehingga berkontribusi signifikan terhadap produksi minyak sawit nasional (Apresian et al., 2020). Di balik kontribusi tersebut, aktivitas pengolahan kelapa sawit juga menghasilkan limbah cair dalam jumlah besar, terutama Palm Oil Mill Effluent (POME), yang memerlukan pengelolaan serius.

POME mengandung bahan organik dalam konsentrasi tinggi yang umumnya tercermin dari nilai Chemical Oxygen Demand (COD) yang besar. Apabila dibuang tanpa pengolahan yang memadai, limbah ini dapat menurunkan kualitas perairan, menimbulkan bau tidak sedap, dan berkontribusi terhadap pembentukan gas rumah kaca seperti metana (Lee et al., 2019; Sodri & Septriana, 2022). Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pengolahan POME memiliki urgensi tinggi, tidak hanya untuk memenuhi regulasi lingkungan, tetapi juga untuk menjaga keberlanjutan industri kelapa sawit.

Berbagai teknologi telah dikembangkan untuk mengolah POME, meliputi proses biologis, kimia, dan fisika. Namun, sebagian metode masih menghadapi kendala berupa biaya operasional yang tinggi, waktu proses yang relatif lama, serta kompleksitas pengoperasian (Sisnayati et al., 2022). Oleh sebab itu, diperlukan alternatif pengolahan yang lebih sederhana, efisien, dan ekonomis.

Salah satu metode yang relatif sederhana dan banyak dikaji adalah adsorpsi. Metode ini dikenal mudah dioperasikan, fleksibel, dan berpotensi menggunakan adsorben berbiaya rendah dari limbah biomassa (Rathi & Kumar, 2021). Dalam beberapa tahun terakhir, pemanfaatan limbah biomassa sebagai adsorben alternatif semakin banyak dikembangkan karena dinilai lebih ramah lingkungan dan mendukung prinsip pemanfaatan limbah.

Ampas kopi merupakan salah satu limbah biomassa yang dihasilkan dalam jumlah besar oleh sektor rumah tangga maupun industri. Material ini memiliki struktur berpori dan gugus fungsi aktif yang berpotensi mendukung proses adsorpsi (Chiang et al., 2020). Sejumlah penelitian juga menunjukkan bahwa ampas kopi dapat dimanfaatkan untuk menyerap berbagai kontaminan dalam air limbah, seperti zat warna dan senyawa organik (Block et al., 2021). Namun, kajian yang secara khusus mengevaluasi kemampuan ampas kopi untuk menurunkan COD pada POME, sekaligus menelaah kinetika adsorpsinya, masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi

efektivitas adsorben limbah ampas kopi terhadap penurunan COD POME dan mengidentifikasi model kinetika yang paling sesuai.

## METODE

### Alat dan Bahan

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini ialah limbah ampas kopi dan Palm Oil Mill Effluent (POME). Bahan kimia yang digunakan meliputi asam klorida (HCl) dan asam sulfat (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Peralatan utama yang digunakan dalam pembuatan adsorben meliputi furnace, ayakan 200 mesh, hot plate, oven, gelas beker, dan neraca digital. Karakterisasi adsorben dilakukan menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM) dan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR).

### Tahap Pembuatan Adsorben

Ampas kopi yang diperoleh dari Yello Coffee Pekanbaru dikeringkan pada suhu 50°C selama 4 jam, kemudian pada suhu 110°C selama 8 jam. Tahap pengeringan bertujuan menurunkan kadar air hingga kurang dari 10%. Setelah itu, sampel didiamkan pada suhu ruang selama 12 jam. Ampas kopi kering kemudian diayak menggunakan ayakan 200 mesh untuk memperoleh ukuran partikel sekitar 200 µm agar luas permukaan kontak adsorben meningkat (Sa'bandi et al., 2021).

Adsorben disiapkan dari karbon aktif limbah ampas kopi yang telah diayak berukuran 200 mesh. Sampel kemudian dipanaskan di dalam furnace pada suhu 350°C selama 4 jam. Selanjutnya, sebanyak 100 g karbon aktif direndam dalam 300 mL larutan HCl selama 24 jam dengan perbandingan 1:3 (b/v) (Robbika, 2022). Setelah proses perendaman, adsorben dicuci menggunakan akuades hingga pH mendekati netral, lalu dikeringkan dalam oven pada suhu 100°C selama 3 jam. Adsorben yang telah diperoleh kemudian dikarakterisasi menggunakan FTIR dan SEM (Robbika, 2022).

### Penyiapan Larutan Limbah Cair Kelapa Sawit

Larutan POME diambil dari kolam limbah pabrik kelapa sawit dengan karakteristik awal COD sebesar 653,33 mg L<sup>-1</sup>. Percobaan adsorpsi dilakukan menggunakan 100 mL POME dan 3 g adsorben, dengan variasi waktu kontak 35, 45, 55, 65, 75, 85, dan 95 menit. Efisiensi adsorpsi (%RE) dan kapasitas adsorpsi (qe) dihitung berdasarkan perbedaan konsentrasi awal (C<sub>0</sub>) dan konsentrasi akhir (C<sub>e</sub>).

### Pengujian Kinetika Adsorpsi

Sebanyak 100 mL POME dan 3 g adsorben dimasukkan ke dalam gelas beker 500 mL untuk setiap variasi waktu kontak. Campuran diaduk menggunakan magnetic stirrer selama 35, 45, 55, 65,

75, 85, dan 95 menit. Setelah proses adsorpsi selesai, sampel dipindahkan ke tabung sentrifus yang telah dibersihkan menggunakan H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Sebanyak 2,5 mL sampel kemudian direaksikan dengan 1,5 mL digestron COD tinggi dan 3,5 mL larutan pereaksi sulfat. Campuran dikocok perlahan, dipanaskan dalam COD reactor pada suhu 150°C selama 2 jam, kemudian didinginkan. Nilai COD selanjutnya ditentukan menggunakan spektrofotometer UV-Vis untuk mengevaluasi efektivitas adsorpsi dan waktu kontak optimum (Rios et al., 2024).

**Metode Analisis**

**Efisiensi Penyerapan RE**

**Efisiensi Penyerapan RE** (Removal Efisiensi) dapat dihitung dengan persamaan Efisiensi Penyerapan Removal Efisiensi dihitung dengan:

$$(\%RE) = \frac{(C_o - C_e)}{C_o} 100\% \tag{1}$$

**Kapasitas adsorpsi pada keseimbangan dihitung dengan:**

$$q_e = c_o - c_e \times \frac{V}{m}$$

- Co :Konsentrasi awal larutan Pome (mg/L)
- Ce : Kosentrasi kesetimbangan larutan pome
- V : Volume Larutan (L)
- M : Massa Adsorben (g)

**Kapasitas Penyerapan (qe)**

Jumlah Pome yang di adsorpsi dengan adsorben limbah ampas kopi pada kesetimbangan dapat di hitung dengan menggunakan persamaan :

$$q_e = \frac{(C_o - C_e)V}{m} \tag{2}$$

- qe : Pome yang di serap dalam adsorben limbah ampas kopi (mg/g)
- Co : Konsentrasi awal larutan sampel pome(mg/L)
- Ce : Konsentrasi kesetimbangan Larutan Pome (mg/L)
- V : Volume larutan sampel Pome (L)
- m : Berat adsorben limbah ampas kopi (g)

**Model Kinetika Adsorpsi**

Analisis kinetika adsorpsi dilakukan menggunakan model Elovich, Bangham, dan Boyd. Kesesuaian masing-masing model ditentukan berdasarkan nilai koefisien determinasi (R<sup>2</sup>). Model dengan nilai R<sup>2</sup> tertinggi dianggap paling representatif dalam menggambarkan data eksperimen. Proses fitting dilakukan melalui regresi linier menggunakan Microsoft Excel.

**Model Elovich**

Model Elovich digunakan untuk menggambarkan kinetika adsorpsi pada permukaan heterogen, yaitu ketika energi adsorpsi berubah seiring meningkatnya jumlah adsorbat yang terikat. Pada penelitian ini, model Elovich digunakan sebagai model pembanding

untuk melihat kecenderungan interaksi adsorpsi pada permukaan adsorben.

Data waktu kontak, konsentrasi awal (C<sub>0</sub>), konsentrasi akhir (C<sub>e</sub>), volume larutan, dan massa adsorben digunakan untuk menghitung jumlah adsorbat yang teradsorpsi sebelum dilakukan pemodelan kinetika.

$$\frac{(C_o - C_e)v}{\beta m} \tag{5}$$

- Co : konsentrasi awal sampe larutan pome (mg/L)
- Ce : konsentrasi larutan pome (mg/L)
- V : volume larutan sampel pome (L)
- m : berat adsorben limbah ampas kopi (g)

Model Elovich dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$(q_t = 1/\beta \ln(\alpha\beta) + 1/\beta \ln(\alpha\beta) \ln t \tag{6}$$

Parameter model Elovich diperoleh dari hubungan linier sesuai bentuk persamaan Elovich. Nilai kemiringan dan intersep selanjutnya digunakan untuk mengestimasi konstanta model.

Kesesuaian model dievaluasi melalui nilai R<sup>2</sup> hasil regresi linier.

$$\beta = \frac{1}{\text{kemiringan}} \tag{7}$$

$$\alpha = \left( \frac{\text{intersep}}{\text{kemiringan}} \right)$$

**2.6.2 Model Bangham**

Model Bangham digunakan untuk mengevaluasi kemungkinan peran difusi pori sebagai tahap pengendali dalam proses adsorpsi. Model ini bersifat empiris dan sering digunakan untuk menilai sejauh mana perpindahan adsorbat ke dalam pori adsorben memengaruhi laju penyerapan (Afandy, 2024).

$$\log \left[ \log \left( \frac{C_o}{C_o - q_t M} \right) \right] = \log \left( \frac{k_o M}{2.30 V} \right) + \alpha \log t \tag{8}$$

Dimana:

- Co = onsentrasi awal adsorbat (mg/L)
- qt = jumlah adsorbat teradsorpsi pada waktu t (mg/g)
- M= massa adsorben (g)
- V= volume larutan (ml)
- k<sub>0</sub>= konstanta model Bangham
- α= konstanta eksponen yang menunjukkan kontribusi difusi pori
- t= waktu kontak (menit)

**Model Boyd**

Model Boyd digunakan untuk membedakan apakah mekanisme pengendali adsorpsi lebih dipengaruhi oleh difusi film atau difusi intrapartikel. Pada penelitian ini, model Boyd digunakan sebagai model pendukung untuk memperkuat interpretasi mekanisme perpindahan massa.

$$B_t = -0.4977 - \ln(1 - F) \tag{9}$$

Dengan:

$$F = \frac{q_t}{q_e}$$

Keterangan:

$B_t$  = fungsi Boyd pada waktu  $t$

$F$  = fraksi adsorbat yang teradsorpsi

$q_t$  = jumlah adsorbat teradsorpsi pada waktu  $t$  (mg/g)

$q_e$  = jumlah adsorbat teradsorpsi pada keadaan setimbang (mg/g)

$t$  = waktu (menit)

Di mana  $B_t$  merupakan konstanta Boyd;  $Q_t$  adalah jumlah adsorbat yang teradsorpsi pada adsorben pada waktu  $t$  ( $\text{mg g}^{-1}$ ); dan  $Q_e$  adalah jumlah adsorbat yang teradsorpsi pada adsorben pada keadaan setimbang ( $\text{mg g}^{-1}$ ). Untuk menguji isoterm ini,  $B_t$  direpresentasikan secara grafis sebagai fungsi dari waktu kontak ( $t$ ), kemudian ditentukan nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ).

**Interpretasi Model Kinetika**

Konstanta laju dan kapasitas adsorpsi keseimbangan dianalisis melalui regresi linier untuk menilai kesesuaian masing-masing model terhadap data eksperimen. Model dengan nilai  $R^2$  tertinggi diinterpretasikan sebagai model yang paling sesuai, sedangkan model lain digunakan untuk memberikan penjelasan pendukung terhadap mekanisme adsorpsi yang terjadi. Tahapan pembuatan adsorben dari limbah ampas kopi ditunjukkan pada Gambar 1.



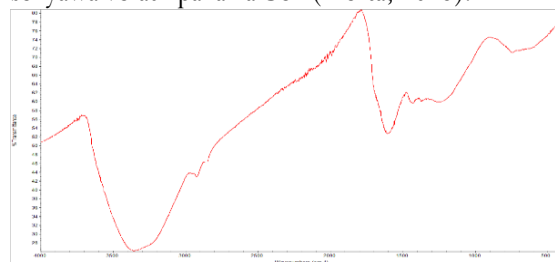
**Gambar 1.** Proses Pembuatan Adsorben dari Limbah Ampas Kopi; (a) Limbah Ampas Kopi; (b) Pengeringan; (c) Pengayakan; (d) Karbonisasi; (e) Acidifikasi; (f) Pengecekan pH; (g) Pengeringan

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**Karakterisasi Adsorben Menggunakan FTIR**

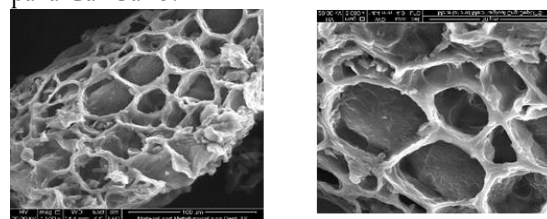
Berdasarkan hasil karakterisasi gugus fungsi menggunakan FTIR pada Gambar 2, adsorben limbah ampas kopi menunjukkan beberapa pita serapan yang mengindikasikan keberadaan gugus fungsi aktif di permukaannya. Pita pada bilangan gelombang

$2117,23 \text{ cm}^{-1}$  diinterpretasikan sebagai vibrasi stretching O–H, pita pada  $2007,73 \text{ cm}^{-1}$  menunjukkan vibrasi C–H, pita pada  $1593,43 \text{ cm}^{-1}$  berkaitan dengan vibrasi C–N, dan pita pada  $1429,19 \text{ cm}^{-1}$  menunjukkan vibrasi stretching C–O dari gugus karboksilat. Perubahan intensitas pita setelah modifikasi menunjukkan bahwa perlakuan asam dan pemanasan memengaruhi karakter permukaan adsorben, termasuk kemungkinan berkurangnya senyawa volatil pada karbon (Merta, 2015).



**Gambar 2.** Grafik FTIR Adsorben Limbah Ampas Kopi

Pengamatan SEM menunjukkan bahwa adsorben memiliki permukaan yang tidak beraturan dengan ukuran pori yang bervariasi. Morfologi ini mengindikasikan tersedianya area permukaan dan rongga yang dapat mendukung proses adsorpsi pada limbah POME. Selain itu, dominasi unsur karbon dan oksigen menunjukkan bahwa adsorben tersusun oleh kerangka karbon dengan gugus beroksigen pada permukaan, yang berpotensi meningkatkan interaksi dengan adsorbat (Mirkhalili et al., 2017). Morfologi permukaan adsorben hasil pengamatan SEM disajikan pada Gambar 3.



**Gambar 3.** Hasil Karakterisasi Morfologi SEM Pengaruh Waktu Kontak terhadap Penurunan COD POME

Volume larutan pome = 100 ml  
 Berat Adsorben = 3.0 gram

Pada Tabel 1 terlihat bahwa peningkatan waktu kontak hanya mampu menaikkan efisiensi penurunan COD hingga nilai maksimum 13,13% pada menit ke-65, kemudian cenderung konstan hingga menit ke-95. Nilai ini masih tergolong rendah jika dikaitkan dengan kebutuhan pengolahan limbah cair industri yang umumnya menuntut penyisihan bahan organik secara lebih signifikan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kemampuan adsorben ampas

kopi dalam mengikat senyawa organik kompleks penyusun COD POME masih terbatas. Keterbatasan ini diduga berkaitan dengan jumlah situs aktif yang belum optimal, luas permukaan pori yang terbatas, dan hambatan perpindahan massa dari fase cair ke permukaan adsorben. Dengan demikian, penggunaan adsorben ampas kopi pada kondisi penelitian ini masih memerlukan optimasi lebih lanjut sebelum dipertimbangkan untuk penerapan skala industri.

**Tabel 1.** Data pengaruh waktu kontak terhadap pengadsorpsi POME

Waktu	(C0) (mg/)	Ce mg/L	RE	mg/g
	653.331	632.706	3.156	0.687
35	1	3	8	4
	653.331	648.810	0.691	0.150
45	1	7	9	6
	653.331	594.771	8.963	1.951
55	1	5	2	9
	653.331	567.517	13.13	2.860
65	1	3	48	4
	653.331	567.517	13.13	2.860
75	1	3	48	4
	653.331	567.517	13.13	2.860
85	1	3	48	4
	653.331	567.517	13.13	2.860
95	1	3	48	4

**Analisis Model Elovich**

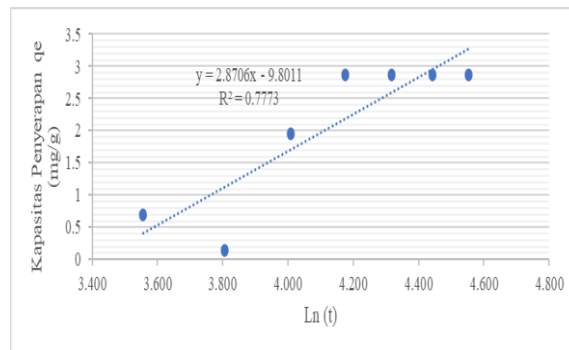
Model Elovich digunakan untuk meninjau kemungkinan terjadinya adsorpsi pada permukaan heterogen. Pada konteks penelitian ini, model tersebut membantu menjelaskan kecenderungan perubahan laju adsorpsi seiring bertambahnya waktu kontak. Data parameter kinetika adsorpsi model Elovich disajikan pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Data Parameter Kinetika Adsorpsi Model Elovich

Waktu	t	mg/g	mg/g
35	3.555	0.6874	0.4039
45	3.807	0.1506	1.1253
55	4.007	1.9519	1.7012
65	4.174	2.8604	2.1807
75	4.317	2.8604	2.5915
85	4.443	2.8604	2.9507
95	4.554	2.8604	3.27

Kurva linier model Elovich ditunjukkan pada Gambar 4. Nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) sebesar 0,7773 menunjukkan bahwa model Elovich mampu menjelaskan sebagian besar kecenderungan data adsorpsi, tetapi belum menjadi model terbaik dalam penelitian ini. Dengan demikian, model Elovich

dapat digunakan sebagai model pendukung untuk memahami heterogenitas permukaan adsorben, namun tidak menjadi model utama yang paling representatif.



**Gambar 4.** Kurva Model Elovich

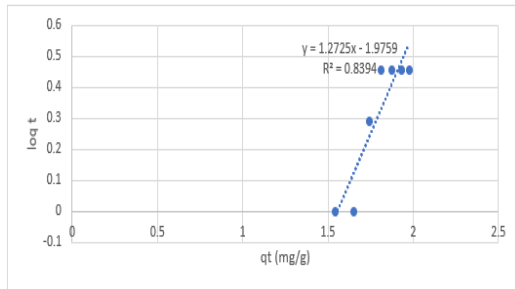
**Analisis Model Bangham**

Model Bangham digunakan untuk mengevaluasi peran difusi pori terhadap laju adsorpsi. Dalam penelitian ini, model ini menjadi fokus utama interpretasi kinetika karena memberikan kecocokan data terbaik dibandingkan model lainnya. Data kinetika adsorpsi model Bangham disajikan pada Tabel 3.

**Tabel 3.** Data Kinetika Adsorpsi Model Bangham

Waktu	(mg/g)	log t	qt (mg/g)
35	0.6874	1.5441	-0.1628
45	0.1506	1.6532	-0.8222
55	1.9519	1.7404	0.2905
65	2.8604	1.8129	0.4564
75	2.8604	1.8751	0.4564
85	2.8604	1.9294	0.4564
95	2.8604	1.9777	0.4564

Kurva linier model Bangham ditunjukkan pada Gambar 5. Berdasarkan hasil analisis kinetika adsorpsi menggunakan model Bangham, diperoleh hubungan linier antara log waktu ( $\log t$ ) dan  $\log \log [C_0 / (C_0 - q_t m / V)]$ . Hasil regresi linier menunjukkan nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) sebesar 0,8394. Nilai tersebut menunjukkan bahwa 83,94% variasi kapasitas adsorpsi dapat dijelaskan oleh model Bangham, sedangkan sisanya dipengaruhi faktor lain di luar model. Nilai  $R^2$  yang paling tinggi di antara model yang dianalisis menegaskan bahwa model Bangham merupakan model yang paling sesuai untuk menggambarkan kinetika adsorpsi pada penelitian ini. Temuan tersebut mengindikasikan bahwa difusi adsorbat menuju pori adsorben berperan penting dalam proses penyerapan COD POME.



**Gambar 5.** Kurva Model Bangham

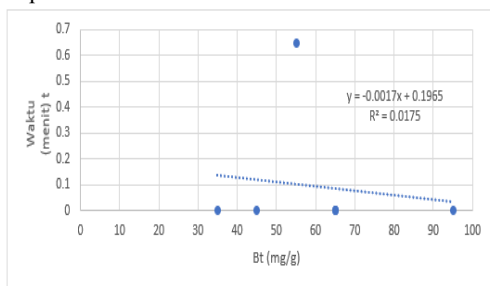
**Analisis Model Boyd**

Model Boyd digunakan untuk mengevaluasi apakah mekanisme perpindahan massa lebih dipengaruhi oleh difusi film atau difusi intrapartikel. Dalam penelitian ini, model Boyd berfungsi sebagai model pendukung untuk memperjelas interpretasi mekanisme adsorpsi.

**Tabel 4.** Data Parameter Kinetika Adsorpsi Model Boyd

Waktu (menit)	$q_t$ (mg/g)	$q_t/q_e$	$Bt$ (mg/g)
35	0.6874	0.2403	-0.2228
45	0.1506	0.0527	-0.4436
55	1.9519	0.6824	0.6492
65	2.8604	1.0000	$\infty$
75	2.8604	1.0000	$\infty$
85	2.8604	1.0000	$\infty$
95	2.8604	1.0000	$\infty$

Data parameter kinetika adsorpsi model Boyd disajikan pada Tabel 4, sedangkan kurva liniernya ditunjukkan pada Gambar 6. Berdasarkan hasil regresi linier antara fungsi Boyd ( $Bt$ ) dan waktu adsorpsi, diperoleh nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) sebesar 0,0175. Nilai ini menunjukkan bahwa hubungan linier antara  $Bt$  dan waktu adsorpsi sangat lemah, sehingga model Boyd tidak mampu merepresentasikan data secara memadai.



**Gambar 6.** Kurva Model Boyd

Hasil tersebut mengindikasikan bahwa model Boyd tidak menjadi model utama dalam penelitian ini. Meskipun demikian, kecenderungan data menunjukkan bahwa hambatan perpindahan massa pada lapisan batas masih dapat berperan dalam sistem adsorpsi yang diamati.

**KESIMPULAN DAN SARAN**

Hasil penelitian menunjukkan bahwa adsorben berbasis limbah ampas kopi mampu menurunkan COD limbah POME, dengan waktu kontak optimum pada 65 menit. Pada kondisi tersebut diperoleh kapasitas adsorpsi sebesar 2,8604 mg/g dan efisiensi penyerapan sebesar 13,13%, kemudian nilai adsorpsi cenderung stabil yang menandakan adsorben mulai mendekati kejenuhan. Karakterisasi menggunakan FTIR dan SEM menunjukkan keberadaan gugus fungsi aktif serta permukaan berpori yang mendukung proses adsorpsi.

Berdasarkan analisis kinetika, model Bangham merupakan model yang paling sesuai untuk menggambarkan adsorpsi COD POME oleh adsorben limbah ampas kopi, sedangkan model Elovich dan Boyd hanya berperan sebagai model pendukung interpretasi. Hal ini menunjukkan bahwa difusi menuju pori adsorben memiliki peran penting dalam proses adsorpsi pada kondisi penelitian ini.

Penelitian lanjutan disarankan untuk mengkaji pengaruh parameter proses lain, seperti pH larutan, dosis adsorben, dan ukuran partikel, serta melakukan modifikasi adsorben agar kapasitas dan efisiensi adsorpsi meningkat. Selain itu, pengujian pada skala yang lebih besar dan pada parameter pencemar lain, seperti BOD dan TSS, perlu dilakukan untuk memperoleh gambaran kinerja adsorben yang lebih komprehensif.

**DAFTAR PUSTAKA**

Adeola, A.O. & Forbes, P.B.C. 2021. Advances in water treatment technologies for removal of polycyclic aromatic hydrocarbons: Existing concepts, emerging trends, and future prospects. *Water Environment Research*, 93(3):343–359.

Afandy, M. A. (2024). Adsorption kinetics and pore diffusion evaluation using multiple kinetic models including Bangham model. *Jurnal Integrasi Proses*, 13(2), 174–183.

Apresian, S. R., Varkkey, H., & Choiruzzad, B. (2020). Palm oil development in Riau, Indonesia: Balancing economic growth and environmental protection. *Journal of ASEAN Studies*, 2(1), 1–29.

Biegun, M., Dymerska, A., Chen, X. & Mijowska, E. 2020. Study of the active carbon from used coffee grounds as the active material for a high-temperature stable supercapacitor with ionic-liquid electrolyte. *Materials*, 13(18):1-14.

- Block, I., Günter, C., Rodrigues, A. D., Paasch, S., Hesemann, P., & Taubert, A. (2021). Carbon adsorbents from spent coffee for removal of methylene blue and methyl orange from water. *Materials*, 14(14), 1–18.
- Chiang, C.H., Chen, J. & Lin, J.H. 2020. Preparation of pore-size tunable activated carbon derived from waste coffee grounds for high adsorption capacities of organic dyes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 8(4):1-11.
- Figueroa Campos, G.A., Perez, J.P.H., Block, I., Sagu, S.T., Saravia Celis, P., Taubert, A. & Rawel, H.M. 2021. Preparation of activated carbons from spent coffee grounds and coffee parchment and assessment of their adsorbent efficiency. *Processes*. 9(8):2-18.
- Khalil, I., Thomas, K., Jabraoui, H., Bazin, P. & Maugé, F. 2020. Selective elimination of phenol from hydrocarbons by zeolites and silica-based adsorbents—Impact of the textural and acidic properties. *Journal of Hazardous Materials*. 384(1):1-14.
- Lan, D., Zhu, H., Zhang, J., Li, S., Chen, Q., Wang, C., Wu, T. & Xu, M. 2022. Adsorptive removal of organic dyes via porous materials for wastewater treatment in recent decades: A review on species, mechanisms and perspectives. *Chemosphere*. 293(1):1-23.
- Lee, Z.S., Chin, S.Y., Lim, J.W., Witoon, T. & Cheng, C.K. 2019. Treatment technologies of palm oil mill effluent (POME) and olive mill wastewater (OMW): A brief review. *Environmental Technology and Innovation*. 15(2019):1-19.
- Pérez-Botella, E., Valencia, S. & Rey, F. 2022. Zeolites in Adsorption Processes: State of the Art and Future Prospects, *Chemical Reviews*. 122(24):17647- 17695.
- Rathi, B.S. & Kumar, P.S. 2021. Application of adsorption process for effective removal of emerging contaminants from water and wastewater. *Environmental Pollution*. 280(2021):1-19.
- Sodri, A. & Septriana, F.E. 2022. Biogas Power Generation from Palm Oil Mill Effluent (POME): Techno-Economic and Environmental Impact Evaluation. *Energies*. 15(19):1-16.
- Sisnayati, S., Dewi, D.S., Komala, R., Meilianti, M. & Faizal, M. 2022. Pengolahan limbah Palm Oil Mill Effluent (POME) menggunakan proses aerasi dalam kolom aerator plat berlubang. *Jurnal Teknik Kimia*, 28(3):107–115.
- Tran, T.H., Le, A.H., Pham, T.H., Nguyen, D.T., Chang, S.W., Chung, W.J. & Nguyen, D.D. 2020. Adsorption isotherms and kinetic modeling of methylene blue dye onto a carbonaceous hydrochar adsorbent derived from coffee husk waste. *Science of the Total Environment*, 725(2020):1-10.
- Tran, H. N., You, S. J., Hosseini-Bandegharai, A., & Chao, H. P. (2020). Mistakes and inconsistencies regarding adsorption of contaminants from aqueous solutions: A critical review of Boyd and intraparticle diffusion models., 173, 115423